

Оглавление

Глава 1.

Введение в метрологию для микро- и нанотехнологий

- 1.1 Что такое инженерная нанометрология
- 1.2 Содержание этой книги
- 1.3 Список использованных источников

Глава 2.

Основы метрологии

- 2.1 Введение
- 2.2 Единицы измерения СИ
- 2.3 Длина
- 2.4 Масса
- 2.5 Сила
- 2.6 Угол
- 2.7 Прослеживаемость измерений
- 2.8 Точность, прецизионность, разрешение, погрешность и неопределённость измерений
 - 2.8.1 Точность и прецизионность измерений
 - 2.8.2 Разрешение и погрешность измерений
 - 2.8.3 Неопределённость измерений
 - 2.8.3.1 Суммарная неопределённость измерений
 - 2.8.3.2 Руководство по выражению неопределённости в измерениях (GUM)
 - 2.8.3.3 Метод Монте-Карло
- 2.9 Список использованных источников

Глава 3.

Принципы разработки прецизионных средств измерений

- 3.1 Геометрия
- 3.2 Кинематика
 - 3.2.1 Сочленение Кельвина
 - 3.2.2 Реализация единственной степени свободы
- 3.3 Динамика
- 3.4 Принцип Аббе
- 3.5 Упругое сжатие
- 3.6 Структурные схемы
 - 3.6.1 Механический контур
 - 3.6.2 Тепловой контур
 - 3.6.3 Метрологический контур
- 3.7 Материалы
 - 3.7.1 Минимизация теплового воздействия
 - 3.7.2 Минимизация механического воздействия
- 3.8 Симметрия
- 3.9 Виброизоляция
 - 3.9.1 Источники вибраций

- 3.9.2 Пассивная виброизоляция
- 3.9.3 Подавление
- 3.9.4 Внутренний резонанс
- 3.9.5 Активная виброизоляция
- 3.9.6 Акустический шум
- 3.10 Список использованных источников

Глава 4.

Прослеживаемость длины при помощи интерферометрии

4.1 Лазеры

- 4.1.1 Принцип действия гелий-неонового лазера
- 4.1.2 Способы стабилизации длины волны одночастотного лазера
- 4.1.3 Стабилизация частоты лазера с использованием метода насыщенного поглощения
 - 4.1.3.1 Стабилизация лазера с двухчастотным режимом работы
- 4.1.4 Стабилизация лазера, излучающего на длине волны 633 нм, с использованием эффекта Зеемана
- 4.1.5 Калибровка частоты (стабилизированного) лазера, излучающего на длине волны 633 нм
- 4.1.6 Существующие и перспективные стандарты лазерной частоты

4.2 Обеспечение прослеживаемости длины

4.3 Концевые меры как средство обеспечения прослеживаемости

4.4 Введение в интерферометрию

- 4.4.1 Свет как волна
- 4.4.2 Измерение биения в случае, когда $\omega_1 \neq \omega_2$
- 4.4.3 Видность и контраст
- 4.4.4 Интерференция белого света и длина когерентности

4.5 Схемы интерферометров

- 4.5.1 Интерферометры Майкельсона и Тваймана-Грина
 - 4.5.1.1 Модификация Тваймана-Грина
- 4.5.2 Интерферометр Физо
- 4.5.3 Интерферометры Жамена и Маха-Цендера
- 4.5.4 Интерферометр Фабри-Перо

4.6 Измерение длины концевых мер

- 4.6.1 Интерферометр для измерения длин концевых мер
 - 4.6.1.1 Анализ интерференционной картины – сдвиг фаз
 - 4.6.1.2 Анализ картин мультиволновой интерференции
 - 4.6.1.3 Длина волны в вакууме
 - 4.6.1.4 Тепловые эффекты
 - 4.6.1.5 Измерение коэффициента преломления
 - 4.6.1.6 Апертурная коррекция
 - 4.6.1.7 Поверхность и эффекты изменения фазы
- 4.6.4 Источники погрешности
 - 4.6.4.1 Неопределённость разделения интерференционных полос
 - 4.6.4.2 Неопределённость мультиволновой интерферометрии
 - 4.6.4.3 Неопределённость длины волны в вакууме
 - 4.6.4.4 Неопределённость вследствие тепловых эффектов
 - 4.6.4.5 Неопределённость коэффициента преломления

- 4.6.4.6 Неопределённость апертурной коррекции
- 4.6.4.7 Неопределённость изменения фазы
- 4.6.4.8 Косинусная погрешность
- 4.7 Список использованных источников

Глава 5.

Измерения перемещений

- 5.1 Введение
- 5.2 Интерферометрия перемещений
 - 5.2.1 Основы интерферометрии перемещений
 - 5.2.2 Гомодинная интерферометрия
 - 5.2.3 Гетеродинная интерферометрия
 - 5.2.4 Счет и разделение интерференционных полос
 - 5.2.5 Двухпроходная интерферометрия
 - 5.2.6 Дифференциальная интерферометрия
 - 5.2.7 Интерферометрия с качающейся частотой
 - 5.2.8 Источники погрешности
 - 5.2.8.1 Тепловое расширение
 - 5.2.8.2 Длина мертвого хода
 - 5.2.8.3 Косинусная погрешность
 - 5.2.8.4 Нелинейность
 - 5.2.8.5 Коррекция Хейдемманна
 - 5.2.8.6 Источники случайной погрешности
 - 5.2.8.7 Прочие источники погрешности
 - 5.2.9 Угловые интерферометры
- 5.3 Ёмкостные датчики
- 5.4 Индуктивные датчики
- 5.5 Оптические датчики
- 5.6 Оптоволоконные датчики
- 5.7 Калибровка датчиков перемещения
 - 5.7.1 Калибровка с использованием оптической интерферометрии
 - 5.7.1.1 Калибровка с использованием интерферометра Фабри-Перо
 - 5.7.1.2 Калибровка с использованием измерительного лазерного инструмента
 - 5.7.2 Калибровка с использованием рентгеновской интерферометрии
- 5.8 Список использованных источников

Глава 6.

Средства измерений параметров рельефа поверхности

- 6.1 Введение
- 6.2 Понятие пространственной частоты
- 6.3 Исторический обзор
- 6.4 Измерение параметров профиля поверхности
- 6.5 Измерение параметров трехмерной текстуры поверхности
- 6.6 Средства измерений
 - 6.6.1 Стилусные профилометры
- 6.7 Оптические профилометры

- 6.7.1 Ограничения оптических средств измерений
- 6.7.2 Методы оптического сканирования
 - 6.7.2.1 Триангуляционные профилометры
 - 6.7.2.2 Конфокальные микроскопы
 - 6.7.2.2.1 Конфокальная микроскопия в белом свете
 - 6.7.2.3 Профилометрия точечной автофокусировки
- 6.7.3 Оптические методы исследования поверхности
 - 6.7.3.1 Микроскопия с переменным фокусом
 - 6.7.3.2 Фазосдвигающая интерферометрия
 - 6.7.3.3 Цифровая голографическая интерферометрия
 - 6.7.3.4 Когерентная сканирующая интерферометрия
- 6.7.4 Методы рассеяния
- 6.8 Ёмкостные средства измерений
- 6.9 Пневматические средства измерений
- 6.10 Калибровка средств измерений параметров рельефа поверхности
 - 6.10.1 Прослеживаемость измерений параметров рельефа поверхности
 - 6.10.2 Калибровка средств измерения параметров профиля поверхности
 - 6.10.3 Калибровка средств измерений параметров трехмерной текстуры поверхности
- 6.11 Неопределённость измерений параметров рельефа поверхности
- 6.12 Сравнение средств измерений параметров рельефа поверхности
- 6.13 Стандарты на программное обеспечение
- 6.14 Список использованных источников

Глава 7.

Сканирующая зондовая, электронная и ионная микроскопия

- 7.1 Сканирующая зондовая микроскопия
- 7.2 Сканирующая туннельная микроскопия
- 7.3 Атомно-силовая микроскопия
 - 7.3.1 Источники шума в атомно-силовой микроскопии
 - 7.3.1.1 Определение уровня статического шума
 - 7.3.1.2 Определение уровня динамического шума
 - 7.3.1.3 Определение уровня шума XY-сканера
 - 7.3.2 Некоторые типичные артефакты АСМ-изображений
 - 7.3.2.1 Размер и форма зонда
 - 7.3.2.2 Загрязнение зонд
 - 7.3.2.3 Прочие артефакты
 - 7.3.3 Определение системы координат атомно-силового микроскопа
 - 7.3.4 Прослеживаемость в атомно-силовой микроскопии
 - 7.3.4.1 Калибровка АСМ
 - 7.3.5 Измерение силы при помощи АСМ
 - 7.3.6 Определение жесткости кантилевера АСМ
 - 7.3.7 Измерение меж- и внутримолекулярных сил при помощи АСМ
 - 7.3.7.1 Придание зонду функциональных свойств
 - 7.3.8 Измерение расстояния между зондом и образцом
 - 7.3.9 Артефакты при измерении сил методом АСМ
- 7.4 Сканирующая зондовая микроскопия наночастиц
- 7.5 Электронная микроскопия

- 7.5.1 Растровая электронная микроскопия
 - 7.5.1.1 Выбор калибровочного образца для растровой электронной микроскопии
- 7.5.2 Просвечивающая электронная микроскопия
- 7.5.3 Прослеживаемость и калибровка просвечивающих электронных микроскопов
 - 7.5.3.1 Выбор калибровочного образца
 - 7.5.3.2 Линейная калибровка
 - 7.5.3.3 Локальная калибровка
 - 7.5.3.4 Реперная сетка
- 7.5.4 Электронная микроскопия наночастиц
- 7.6 Ионная микроскопия
- 7.7 Список использованных источников

Глава 8.

Характеризация рельефа поверхности

- 8.1 Введение
- 8.2 Характеризация профиля поверхности
 - 8.2.1 Базовая длина
 - 8.2.2 Общее перемещение
 - 8.2.3 Фильтрация профиля
 - 8.2.3.1 Первичный профиль
 - 8.2.3.2 Профиль шероховатости
 - 8.2.3.3 Профиль волнистости
 - 8.2.4 Основные параметры характеристики профиля
 - 8.2.4.1 Обозначения параметров профиля
 - 8.2.4.2 Неоднозначность параметров профиля
 - 8.2.5 Параметры амплитуды профиля (от пиков до впадин)
 - 8.2.5.1 Максимальная высота пика профиля, R_p
 - 8.2.5.2 Максимальная глубина впадины профиля, R_v
 - 8.2.5.3 Максимальная высота профиля, R_z
 - 8.2.5.4 Средняя высота элементов профиля, R_c
 - 8.2.5.5 Общая высота поверхности, R_t
 - 8.2.6 Средние значения параметров профиля
 - 8.2.6.1 Среднее арифметическое отклонение профиля, R_a
 - 8.2.6.2 Среднеквадратичное отклонение профиля, R_q
 - 8.2.6.3 Асимметрия профиля, R_{sk}
 - 8.2.6.4 Эксцесс профиля, R_{ku}
 - 8.2.7 Пространственные параметры
 - 8.2.7.1 Средняя ширина элементов профиля, R_{Sm}
 - 8.2.8 Параметры кривых профиля
 - 8.2.8.1 Коэффициент опорной кривой профиля
 - 8.2.8.2 Коэффициент кривой опорной поверхности
 - 8.2.8.3 Разница высот уровней сечения, $R_{\delta c}$
 - 8.2.8.4 Коэффициент относительной опорной кривой профиля, R_{mr}
 - 8.2.8.5 Кривая амплитуды высоты профиля
 - 8.2.9 Стандарты параметризации профиля
- 8.3 Характеризация трехмерной текстуры поверхности
 - 8.3.1 Фильтрация изображения поверхности

- 8.3.2 Пространственная фильтрация
- 8.3.3 Стандарты параметризации трехмерной текстуры поверхности
- 8.3.4 Унифицированная система координат для текстуры и формы
- 8.3.5 Пространственные параметры
- 8.3.6 Параметры общего изображения
 - 8.3.6.1 Высотные параметры
 - 8.3.6.1.1 Среднеквадратичная высота поверхности, S_q
 - 8.3.6.1.2 Средняя арифметическая высота поверхности, S_a
 - 8.3.6.1.3 Асимметрия распределения высот, S_{sk}
 - 8.3.6.1.4 Эксцесс распределения высот, S_{ku}
 - 8.3.6.1.5 Максимальная высота пиков, S_p
 - 8.3.6.1.6 Максимальная высота долин, S_v
 - 8.3.6.1.7 Максимальная высота поверхности, S_z
 - 8.3.6.2 Пространственные параметры
 - 8.3.6.2.1 Длина автокорреляции, S_{al}
 - 8.3.6.2.2 Коэффициент пропорциональности текстуры поверхности, S_{tr}
 - 8.3.6.3 Смешанные параметры
 - 8.3.6.3.1 Среднеквадратичный градиент поверхности, S_{dq}
 - 8.3.6.3.2 Удельная площадь поверхности, S_{dr}
 - 8.3.6.4 Функциональные параметры и параметры отношений
 - 8.3.6.4.1 Коэффициент пространственных опорных кривых
 - 8.3.6.4.2 Обратный коэффициент пространственных опорных кривых
 - 8.3.6.4.3 Прочие параметры
 - 8.3.6.4.4 Свободный объем, $V_v(mr)$
 - 8.3.6.4.5 Объем материала, $V_m(mr)$
 - 8.3.6.4.6 Мера разности высот, S_{xp}
 - 8.3.6.4.7 Градиент плотности
 - 8.3.6.5 Вспомогательные параметры
 - 8.3.6.5.1 Направление текстуры поверхности, S_{td}
- 8.3.7 Параметры отдельных элементов поверхности
 - 8.3.7.1 Шаг 1 – Выбор элементов
 - 8.3.7.2 Шаг 2 – Сегментация
 - 8.3.7.2.1 Дерево изменений
 - 8.3.7.3 Шаг 3 – Значимые элементы
 - 8.3.7.4 Шаг 4 – Выбор параметризации элементов
 - 8.3.7.5 Шаг 5 – Статистика параметров элемента
 - 8.3.7.6 Параметры элементов
 - 8.3.7.6.1 Плотность пиков, S_{pd}
 - 8.3.7.6.2 Средняя арифметическая кривизна пиков, S_{pc}
 - 8.3.7.6.3 Высота поверхности по десяти точкам, S_{10z}
 - 8.3.7.6.4 Высота пиков по пяти точкам, S_{5p}
 - 8.3.7.6.5 Высота долин по пяти точкам, S_{5v}
 - 8.3.7.6.6 Площадь замкнутых долин, $S_{da}(c)$
 - 8.3.7.6.7 Площадь замкнутых холмов, $S_{ha}(c)$
 - 8.3.7.6.8 Объем замкнутых долин, $S_{dc}(c)$
 - 8.3.7.6.9 Объем замкнутых холмов, $S_{hv}(c)$
- 8.4 Фрактальные методы

- 8.4.1 Методы линейных фракталов
- 8.4.2 Метод пространственных фракталов
 - 8.4.2.1 Фрактальное разложение объема
 - 8.4.2.2 Фрактальное разложение поверхности
- 8.5 Сравнение характеристик профиля и пространственных характеристик
- 8.6 Список использованных источников

Глава 9.

Координатная метрология

- 9.1 Координатно-измерительные машины (КИМ)
 - 9.1.1 Зондовые системы КИМ
 - 9.1.2 Программное обеспечение КИМ
 - 9.1.3 Юстировка КИМ
 - 9.1.4 КИМ и системы автоматизированного проектирования
 - 9.1.5 Объекты геометрической и свободной формы
 - 9.1.6 Другие типы КИМ
- 9.2 Источники погрешности КИМ
- 9.3 Прослеживаемость, калибровка и проверка работы КИМ
 - 9.3.1 Прослеживаемость КИМ
- 9.4 КИМ малого диапазона
 - 9.4.1 Автономные КИМ малого диапазона
 - 9.4.1.1 КИМ малого диапазона со штриховой шкалой
 - 9.4.1.2 КИМ малого диапазона с лазерным интерферометром
- 9.5 Зонды КИМ малого диапазона
- 9.6 Калибровка КИМ малого диапазона
 - 9.6.1 Калибровка КИМ малого диапазона с лазерным интерферометром
 - 9.6.2 Калибровка КИМ малого диапазона со штриховой шкалой
- 9.7 Список использованных источников

Глава 10.

Измерения сил и масс

- 10.1 Прослеживаемость традиционных измерений масс
 - 10.1.1 Изготовление международного прототипа килограмма и его первичных копий
 - 10.1.2 Текстура поверхности эталонов массы
 - 10.1.3 Внедрение эталона килограмма
 - 10.1.4 Стабильность эталона килограмма после очистки
 - 10.1.5 Ограничения текущего определения килограмма
 - 10.1.6 Исследования в области альтернативных способов определения килограмма
 - 10.1.6.1 Использование ватт-весов
 - 10.1.6.2 Использование метода Авогадро
 - 10.1.6.3 Использование аккумуляции ионов
 - 10.1.6.4 Использование левитирующего сверхпроводника
 - 10.1.7 Применение компараторов массы
 - 10.1.7.1 Современные механические весы с двумя чашами
 - 10.1.7.2 Электронные весы
- 10.2 Измерения малых масс

- 10.2.1 Взвешивание путем деления
- 10.3 Измерения малых сил
 - 10.3.1 Сравнительные величины малых сил
 - 10.3.2 Прослеживаемость измерений малых сил
 - 10.3.3 Весы для измерения малых сил
 - 10.3.4 Эталоны сравнения для измерения малых сил
 - 10.3.4.1 Грузы
 - 10.3.4.2 Упругие элементы
 - 10.3.4.3 Электростатические весы
 - 10.3.4.4 Резонансные сенсоры
 - 10.3.4.5 Прочие эталоны
- 10.4 Список использованных источников

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ИНДЕКС